

基于BIM的路面LCCA与LCA方法研究综述

游生洁¹, 胡永刚², 刘信所², 郑小燕^{1*}

(1. 福建农林大学 交通与土木工程学院, 福建 福州 350004; 2. 浙江交工集团股份有限公司, 浙江 杭州 310000)

摘要: 目前, 生命周期成本分析(Life Cycle Cost Analysis, LCCA)和生命周期环境评价(Life Cycle Assessment, LCA)方法常用于评估路面在全生命周期范围内的经济和环境影响。然而, 路面LCCA和LCA方法在应用过程中存在数据量大、数据类别多造成评价过程烦琐的问题。针对此类问题, 部分学者尝试将BIM(Building Information Modeling)与LCCA和LCA方法相结合以优化评价流程。在路面领域, LCCA和LCA与BIM相结合的研究还处于初级阶段, 缺少对其相关研究成果的总结。因此, 该文通过对路面LCCA、LCA、LCCA-LCA及与BIM相结合的研究进行归纳总结, 探究其存在的问题与面临的挑战。研究发现: BIM的应用能够优化LCCA和LCA过程, 实现设计与评价的动态协同。但目前存在集成化程度不高、建模软件与评价软件之间统一数据格式标准的欠缺等问题, 因此阻碍了其应用发展。

关键词: 路面工程; BIM; 综述; LCCA; LCA

中图分类号: U495

文献标志码: A

Review on LCCA and LCA Methods for Pavement Based on BIM

YOU Shengjie¹, HU Yonggang², LIU Xinsuo², ZHENG Xiaoyan^{1*}

(1. College of Transportation and Civil Engineering, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350004, China;

2. Zhejiang Communications Construction Group Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 310000, China)

Abstract: Currently, life cycle cost analysis (LCCA) and life cycle assessment (LCA) methods are commonly used to assess the economic and environmental impacts of pavement during the whole life cycle. However, there are drawbacks in the application of LCCA and LCA methods, such as a large amount of data and multiple data categories, which lead to a tedious evaluation process. In view of this, some scholars have tried to combine building information modeling (BIM) with LCCA and LCA methods to optimize the evaluation process. In the pavement field, the combination of LCCA and LCA with BIM is still in its infancy, lacking a summary of relevant research results. Therefore, this paper summarized the research on LCCA, LCA, and LCCA-LCA methods for pavement, as well as their combination with BIM to explore the existing problems and challenges. It is found that the application of BIM can optimize the LCCA and LCA processes and realize the dynamic coordination of design and evaluation. However, the low integration degree and the lack of unified data format standards between modeling software and evaluation software hinder the application and development of BIM.

Keywords: pavement engineering; BIM; review; LCCA; LCA

0 引言

可持续发展对于指导国民经济建设具有重要作

用。2021年, 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年(2021—2025)规划和2035年远景目标纲要强调实施可持续发展战略的目标, 并推动经济

收稿日期: 2022-12-01

基金项目: 福建省社会科学基金资助项目(编号: FJ2022B056); 福建省自然科学基金资助项目(编号: 2022J01158)

作者简介: 游生洁, 男, 硕士研究生. E-mail: 410849482@qq.com

*通信作者: 郑小燕, 女, 博士, 副教授. E-mail: xiaoyanzheng@fafu.edu.cn

社会发展全面绿色转型^[1]。路面作为道路工程的重要组成部分,在耗费大量经济成本的同时,也产生了一系列环境问题,如水泥、沥青等路面材料的生产与使用造成大量温室气体的排放^[2]。为此,迫切需要在路面建设和管理中贯彻可持续发展的理念。

目前的路面管理中多以经济为主导,随着可持续性概念的普及,路面项目所产生的环境影响越来越受到重视。生命周期成本分析(Life Cycle Cost Analysis, LCCA)和生命周期环境评价(Life Cycle Assessment, LCA)是目前最常用于评估路面工程全生命周期内经济与环境影响的方法。LCCA关注路面工程在原材料萃取及生产、施工、使用、养护维修和寿命中止全生命周期阶段的成本^[3],而LCA则关注路面工程全生命周期过程内产生的环境影响,如能源消耗、气体排放等^[4]。近年来,国内外学者已经开展了相关的路面LCCA和LCA研究。然而,路面LCCA和LCA研究还面临一些困难,如评价所需数据繁杂、评价结果碎片化、反馈不及时等^[5]。

BIM(Building Information Modeling)是利用数字模型对项目设计、建造和运营全过程进行管理、优化的工具。通过在LCCA和LCA过程使用BIM,不仅可以优化信息的收集过程,提升评价的效率与准确性,而且可以利用BIM将设计过程与LCCA或LCA过程相结合,改善以往碎片化的评价过程,充分发挥评价结果的指导与反馈作用^[5-7]。该文通过对近期路面工程LCCA、LCA、LCCA-LCA以及其与BIM相结合的研究进行回顾与总结,明确目前存在的问题及发展方向,从而促进路面工程LCCA与LCA方法的实施,为后续路面BIM-LCCA-LCA的高度集成化研究提供思路。

1 路面生命周期成本分析与环境评价

1.1 路面生命周期成本分析

路面LCCA考虑了路面工程在全生命周期范围内的初期建设费用、养护维修费用和用户成本等,如图1所示^[8]。早在1960年,美国国家公路与运输协会(AASHTO)提出了路面LCCA概念,随后分别发布了路面生命周期成本分析-中期技术报告与印第安纳州路面工程生命周期成本手册。近年来,不同组织机构发展了不同的LCCA理论方法,并为其设计了相关的计算机程序,以帮助分析路面设计。例如

AASHTO开发的路面设计系统,美国沥青研究所开发的LCCOST软件,沥青路面联盟开发的APAC-LCA软件包等,大部分软件是借助Excel工具并且基于路面管理系统的项目层面上所研发的,但不同的软件采用不同的系统边界、计算模型和使用限制等。目前,路面LCCA在国际社会已经得到了广泛的应用和发展,且被认为是一种能有效评估路面全生命周期经济性能的技术方法^[9]。

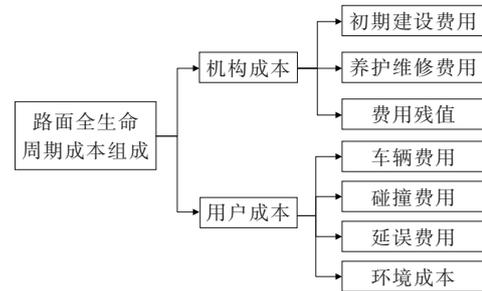


图1 路面生命周期成本组成^[8]

Figure 1 Life cycle cost composition of pavement^[8]

路面LCCA方法在使用过程中不断被完善,其考虑的费用因素也越来越全面。国外路面LCCA已形成相关规范,其数据库也相对成熟;中国由于相应的规范标准和资料积累尚未完成,更多的研究将LCCA方法应用于路面设计和现有方案的比选,并且主要考虑路面结构类型与材料、交通量和路面使用性能变化等因素的影响^[9]。表1为部分LCCA应用涉及的路面类型及生命周期阶段的研究概况。结果显示:目前的研究多关注水泥混凝土路面与沥青路面的原材料萃取加工阶段与养护维修阶段,探究材料选用、能源价格的变化以及气候变化等不确定性因素对路面LCCA的影响。然而与其他产品不同,路面的使用年限较长,使用阶段涉及的用户成本与养护维修费用占据较大比例。但是,目前由于不同地区养护成本计算模型缺乏统一标准,养护费用标准常依据当地经验确定,并且用户成本的计算过程依然存在着较多的不确定性因素(如路面性能变化、车辆碰撞等)^[8],因此研究中尚未能够全面考虑使用阶段的影响因素。此外,贴现率、费用分析期、残值等参数的选择同样会对不同路面设计方案的LCCA造成差异,但是目前研究中多未考虑到时间因素的动态影响^[10]。由此可见,路面LCCA具体费用组成以及量化分析过程复杂,致使不同地区项目成本无法进行比较,难以建立完善的路面管理系统。

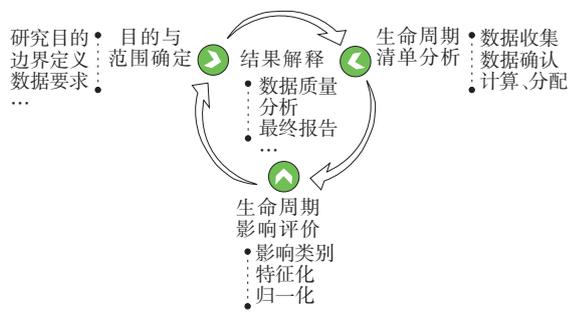
表1 LCCA应用的路面类型和所涉及阶段的总结

Table 1 Summary of pavement types and phases involved in LCCA application

作者	路面类型	生命周期阶段			
		材料萃取与加工	施工	使用	养护维修 寿命终止
Nicuță等 ^[11]	再生沥青路面	✓			
Qiao等 ^[12]	柔性路面				✓
Mirzadeh等 ^[13]	沥青路面	✓		✓	
Mehany等 ^[14]	热拌沥青路面		✓		✓
Chen等 ^[15]	多孔沥青路面				✓
Qiao等 ^[16]	热拌沥青、再生沥青路面	✓	✓	✓	✓
Riekstins等 ^[17]	沥青混凝土路面	✓	✓	✓	✓
Qiao等 ^[18]	沥青路面		✓	✓	✓
Pan等 ^[19]	沥青路面				✓
Jung等 ^[20]	沥青路面、混凝土路面				✓
Qiao等 ^[21]	沥青混凝土路面	✓	✓	✓	✓

1.2 路面生命周期环境评价

20世纪90年代以后,在国际环境毒理学和化学学会、欧洲生命周期评价发展促进委员会等机构的推动下,LCA方法在全球范围内得到了广泛应用。2016年,美国联邦公路管理局发布了路面LCA指南。近年来,越来越多的研究关注到LCA在路面领域中的应用,各种LCA软件和数据库不断推出^[22-26]。其中,国际化标准组织制定和发布了LCA的系列标准《Environmental management—Life cycle assessment—Principles and framework》(ISO 14040: 2006),将LCA分为目的与范围的确定、清单分析、影响评价和结果解释4个部分,如图2所示^[27]。其中,清单分析阶段是对资源和能源消耗以及环境排放进行量化的过程,需要收集大量的相关数据,并为后续影响评价阶段进行定量与定性的表征奠定基础^[28]。因此,在清单分析与影响评价阶段通常涉及繁杂的数据收集与数据处理过程,需要耗费大量的时间。

图2 LCA技术框架^[27]Figure 2 Technical framework of LCA^[27]

国外路面LCA研究起步较早,建立了比较标准的数据库,包括瑞士的Ecoinvent数据库、德国PE公司的Ga Bi数据库、丹麦的LCA Food数据库等;以往中国部分路面LCA分析直接采用国外的LCA基础数据,由于地域环境的不同,致使结果产生较大误差^[23]。当前中国生命周期清单(Life Cycle Inventory, LCI)数据已取得了较多成果,包括了中国科学院生态研究中心的中国LCA数据库(CAS-RCEES)、四川大学的中国生命周期参考数据库(CLCD)等,但是受限于统一的技术指南和明确的发展路线的缺失,尚未建立一个统一完整的本土化LCI数据库^[29]。表2为目前LCA方法应用涉及的路面类型以及生命周期阶段的研究概况。从表2中可以发现:近年来的研究趋势越来越关注环境友好型路面方案,如再生沥青路面、温拌沥青和就地冷再生等绿色材料和施工技术。其中,沥青路面、水泥混凝土路面的材料萃取、加工阶段以及养护维修阶段受到了广泛的关注,而使用阶段与寿命中止阶段环境评价尚未成熟,相关评价模型的建立还需进一步研究和完善^[30-33]。基于过程的LCA、输入-输出LCA以及综合性生命周期分析是目前LCA研究中最常涉及的方法。基于过程法可以量化每一产品单元过程的环境影响;输入-输出法以整体宏观经济为系统边界,计算简便,但是无法量化每一产品或过程具体的环境影响;综合性生命周期分析方法是前面两种方法的结合,其主要以基于过程法为主^[34]。不同的LCA方法对

于数据收集有着不同的要求,但是都包含了大量的环境清单和环境影响评估方面的数据(包含资源与

能源消耗、废弃物排放、大气排放等),使得评价过程耗时长,有待进一步优化和完善。

表 2 LCA 应用的路面类型和所涉及阶段的总结^[3]

Table 2 Summary of pavement types and phases involved in LCA application^[3]

作者	路面类型	生命周期阶段				
		材料萃取与加工	施工	使用	养护维修	寿命终止
Yu 等 ^[35]	水泥、沥青路面	✓	✓	✓	✓	✓
Vidal 等 ^[36]	热拌沥青、温拌沥青路面	✓	✓	✓	✓	✓
Araújo 等 ^[37]	沥青、再生沥青路面	✓	✓	✓	✓	✓
Giani 等 ^[32]	温拌、就地冷回收和再生沥青路面	✓	✓	✓	✓	✓
Anastasiou 等 ^[38]	含有工业副产物的混凝土路面	✓	✓	✓	✓	✓
Smith 等 ^[39]	掺入粉煤灰的混凝土路面	✓				
Farina 等 ^[40]	含有再生材料的沥青路面	✓	✓		✓	
Santos 等 ^[41]	温拌、就地冷回收沥青路面等	✓	✓	✓	✓	✓
Jiang 等 ^[42]	未指定路面类型			✓	✓	
Jiang 等 ^[43]	沥青路面	✓	✓	✓	✓	✓
Zhu 等 ^[4]	再生沥青路面	✓			✓	✓
Chen 等 ^[44]	沥青路面	✓	✓	✓		
Pleşcan 等 ^[45]	沥青路面				✓	
Tang 等 ^[46]	再生混凝土路面	✓	✓	✓	✓	✓
Hossain 等 ^[47]	沥青、混凝土路面	✓	✓		✓	

1.3 路面生命周期成本分析与环境评价的集成

LCCA 和 LCA 方法在评估路面可持续性中经济和环境指标的优势已经被认可^[8, 23]。目前的研究也开始将路面 LCCA 和 LCA 相结合,其常用的评价指标如图 3 所示。然而,这两种评价方法涉及到不同的可持续维度,它们在研究目标和角度上存在根本的区别,其中包括了系统边界的划分不同、经济与环境影响的时间范围的界定不同、分析评价时建模方法的不同,这些差异使得二者在集成过程中面临着较大的阻碍^[48]。为此,Umer 等^[49]开发了一个综合 LCCA 和 LCA 的评价框架,利用归一化方法综合 LCCA 和 LCA 结果实现对路面方案的综合评价。Santos 等^[50]则建立了一套完整的路面 LCCA-LCA 评估框架,采用多准则决策分析方法对不同路面方案进行排序。该方法能够针对 LCCA 和 LCA 在结合时量纲不一致、定性定量混合以及属性值导向不一致的特性,进行科学、合理的选优^[50]。但是,LCCA 与 LCA 方法在应用过程中需要处理的数据类型与数量众多(如材料价格、费用残值、资源消耗以及气体排放等),因此,不仅二者的结合所需要处理的数据条

目更加繁杂,而且由于评价所需项目信息的不完整而导致碎片化的评价过程依旧无法解决。为此,应考虑运用智慧公路、大数据等平台或手段,为评价模型的建立提供更加可靠的数据支撑。



图 3 路面 LCCA-LCA 涉及的评价指标^[51]

Figure 3 Evaluation indexes involved in LCCA-LCA for pavement^[51]

2 BIM 在路面生命周期成本分析与环境评价中的应用

BIM 技术是一种应用于工程设计、建造、运营的数据化工具。可视化、参数化的建模过程使得其在

道路设计中的应用具有很大的优势,能够更加轻松、灵活地将复杂的设计成果以三维形式呈现出来。此外,BIM具有的共享化、信息化、一体化特点,为工程领域发展提供了不同维度的思路^[52]。BIM技术的发展,为帮助LCCA和LCA方法的实施提供了一个多学科信息处理工具。目前,关于BIM技术在LCCA和LCA方法中的应用,逐渐引起各行业的兴趣。

2.1 基于BIM的路面生命周期成本分析

以往,项目成本的初始估算仅依赖于项目的基本信息,导致评估结果误差范围大、可靠性低^[53]。Vitásek等^[54]提到,当BIM和成本估算系统有效地连接在一起时,可以大大简化成本估算人员的工作流程;胡迎迎^[55]在研究中强调了BIM能够帮助道路工程项目实施全过程实现高精度、高效率的成本控制。利用BIM构建数据库可以有效地扩大数据信息采集的范围,提高数据采集的准确性。同时,BIM数据库中的数据信息具有一定的动态性,允许用户进行修改^[56]。因此,如果施工过程发生变化,相关管理者可以对BIM数据库中的数据信息进行适当、合理的调整。BIM数据库的建立有助于LCCA方法的实施。但是,由于缺少统一的数据交换格式并且大多数BIM软件是针对建筑领域,因此BIM与LCCA集成方法在路面中的应用研究还处于起步阶段^[57]。

在建筑领域,Zanni等^[58]利用Dynamo工具来提取Revit模型中的材料信息以及其他相关数据,从而帮助LCCA的实施。研究显示,IFC格式可以实现不同软件之间的数据传递,但是分析过程仍需要使用其他工具(如Pythen、Gabi、Excel等),以帮助实现半自动化的LCCA流程。为了区分不同材料对结果的影响,Marzouk等^[7]在Revit中开发材料数据库,并将材料信息分配到所开发的模型中,从模型中提取材质信息及数量清单用于LCCA。三维信息模型的建立可以很好地避免人工处理数据出现的错误,并确保信息在不断更新后仍能进行操作和维护^[59]。此外,BIM的应用可以缩短不同设计方案的成本分析时间。通过利用参数化模型,更加精确、快速地计算工程量信息,简化LCCA烦琐的工作流程^[60]。

2.2 基于BIM的路面生命周期环境评价

针对LCA方法应用过程的复杂性与耗时性,当前研究开始探讨BIM在LCA方法中应用的优势。Van等^[5]提出了一个框架,通过Dynamo软件将模型

与Excel表格中的清单数据联系,实现了LCA与路面设计阶段的集成。Slobodchikov等^[61]开发了BLR(BIM-LCA-ROAD)模型,利用Trimble Novapoint软件,将模型导入Civil 3D,并在Civil 3D中以附加应用程序的形式进行LCA,实现在设计过程中实时计算环境排放;Marzouk等^[62]提出了一种基于BIM的道路环境影响评估方法,利用BIM在道路建设项目实施前识别和量化与项目相关的环境影响指标。

路面领域BIM与LCA的集成仍需借助特定软件的支持,但在建筑领域有一套解决信息交换与互用问题的格式标准IFC,提供了建筑过程中的各种信息描述与规范定义,并且国际上一些主流BIM软件与LCA软件都支持IFC数据格式的输入和输出^[63]。因此,与道路领域相比,建筑领域BIM与LCA相结合的研究更加广泛^[64-65]。Röck等^[66]提出了基于BIM的环境评价方法,判断单个建筑构件对项目整体环境评估结果的影响。针对不同的设计方案,章驰等^[67]利用Revit-Tally将LCA与BIM相结合,用于在设计阶段进行方案比选。

GaBi和Tally是目前最常用于建筑领域BIM与LCA集成的插件,前者更多地针对有丰富经验的LCA评价专家,而后者是针对非专业人士的工具^[6,64-65]。诸如此类的插件仍在不断发展中,使得评价过程更加接近工程实际,但是目前用户依然无法添加或更改插件中有关于影响评价所需的清单信息,这在很大程度上限制了插件应用的区域。总的来说,BIM的应用简化了传统LCA评价流程,使评价结果更为精确可靠,并且促进了在路面设计阶段实施LCA。然而从以往的研究及应用来看,基于BIM的LCA应用过程中,仍存在数据交换格式不统一、信息传递缺失、LCA与路面方案交互性差、效率低且具有局限性等问题^[68],充分表明BIM与LCA的协同应用仍处于探索阶段。

2.3 基于BIM的路面生命周期成本分析与环境评价

与BIM-LCCA和BIM-LCA集成类似,一些学者针对当前LCCA-LCA研究的不足,考虑在BIM环境中集成LCCA和LCA方法。Santos等^[69]使用BIMEELCA工具将LCCA和LCA的指标信息添加到模型中,实现半自动的评价流程;Shin等^[53]开发了一个基于Excel电子表格的框架,允许用户同时进行LCCA和LCA。利用BIM提取材料的数量信息,可以方便、准确地判断不同方案所产生的经济与环境

综合效益。Jalilzad 等^[70]使用 BIM 与多准则决策分析方法,使施工专业人员能够解决视觉和热舒适度、能源需求和生命周期成本之间的冲突。

在路面领域中,未发现涉及 BIM-LCCA-LCA 的研究,少量的研究也多针对建筑工程。Lu 等^[71]发现 BIM 与 LCCA 和 LCA 的集成在设计阶段应用更多,通过优化建筑设计促进 LCCA 和 LCA 的平衡。值得注意的是,在项目的早期设计阶段,项目信息通常是破碎的、不完整的,而 BIM 可以为其生命周期的早期数据提供信息存储平台。

不同的研究所采用的集成方法不尽相同,致使 BIM 与 LCCA 和 LCA 的集成化程度也存在较大差异。通过对当前 BIM 与 LCCA、LCA 以及 LCCA-LCA 集成的研究进行总结,按照数据流通的方向把目前 BIM 与 LCCA 和 LCA 的集成方法归结为两类:方法 1,利用 BIM 收集项目的几何信息、材料类型以及数量等评价所需的工程量清单信息(Bill of Quantities, BoQ),LCCA 与 LCA 依然由相关软件或专业人员来进行^[53];方法 2, LCCA 和 LCA 数据通过具体的参数添加到 BIM 模型中,设计人员利用 BIM 进行方案设计时同步进行成本分析与环境评价,将评价过程与设计过程集成在 BIM 中进行^[71-73]。具体数据传递过程如图 4 所示。

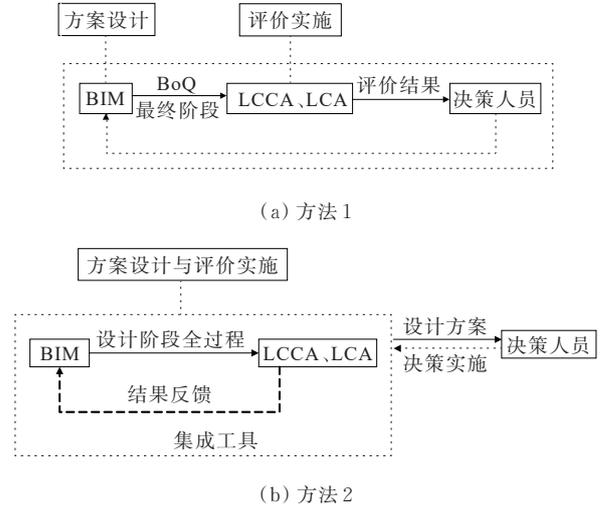


图 4 BIM 与 LCCA 和 LCA 的集成方法
Figure 4 Integration of BIM with LCCA and LCA methods

传统的评价过程通常是在项目设计阶段结束后进行的,评价人员需要收集项目的大量基础信息^[5]。此时,即便采用 BIM 技术协助执行 LCCA 和 LCA 依然是耗时且复杂的,并且依据评价结果对设计方案进行改进仍需要耗费较多的时间与成本。因此,在项目的早期阶段,尽早地考虑设计方案的经济与环境效益,并以此优化设计方案,对于实现路面的绿色经济发展至关重要。

表 3 总结了不同研究中使用的集成方法。

表 3 研究中所采用的集成方法及方式

Table 3 Integration methods and approaches used in research

作者	类型	方法	集成方式
Shin 等 ^[53]	BIM-LCCA-LCA	1	利用 BIM 储存信息,与 Excel 协同构建分析框架
Vitásek 等 ^[54]	BIM-LCCA	1	使用 IFC 和 NWD 格式转换模型至 Navisworks
Marzouk 等 ^[7]	BIM-LCCA	1	利用 BIM 建立数据库
Röck 等 ^[66]	BIM-LCA	2	通过 Dynamo 建立 LCA 数据库与 BIM 模型的连接
Bueno 等 ^[6]	BIM-LCA	1	利用 BIM 储存信息,使用插件 Tally、Gabi 进行分析
Sandberg 等 ^[74]	BIM-LCCA-LCA	2	利用 IFC 格式传递数据
Jalilzad 等 ^[70]	BIM-LCCA-LCA	2	将 BIM 模型转换为 gbxml 文件,实现数据传递
Zanni 等 ^[58]	BIM-LCCA	2	通过 IFC、COBie 格式输出、Dynamo 和 Solibri 等传递数据
Slobodchikov 等 ^[61]	BIM-LCA	2	创建 BLR 模型作为 Civil 3D 中附加应用程序,将 Excel 的清单分析和排放数据导入程序中
Raposo 等 ^[65]	BIM-LCCA-LCA	1	利用 BIM 储存信息
Kaewunruen 等 ^[59]	BIM-LCCA-LCA	1	利用 BIM 储存信息
Lee 等 ^[60]	BIM-LCCA	1	利用 BIM 建立数据库
Santos 等 ^[75]	BIM-LCCA-LCA	2	开发 BIMEELCA 工具允许 BIM 模型链接 Excel 中的信息
Van Eldik 等 ^[5]	BIM-LCA	2	通过 Dynamo 和 Visual Basic 建立 BIM 模型与数据库的连接
Carvalho 等 ^[51]	BIM-LCCA-LCA	2	通过 Dynamo 建立 BIM 模型与 Excel 清单数据的联系
Sobhkhiz 等 ^[76]	BIM-LCA	2	利用语义网实现数据管理,建立 BIM-LCA 框架
Xu 等 ^[77]	BIM-LCA	2	利用 IFC 格式传递数据

调查显示,关于BIM-LCCA-LCA高度集成化的研究正在逐渐增加。当前研究中所涉及两种方法都将BIM作为数据存储中心:方法1,通过收集项目信息建立参数化模型,便于评价人员针对现有的信息进行检查、核对,改善以往项目数据量大、类别多,导致分析耗时长的的问题,有助于提升评价结果的准确性。但是评价过程的推进,取决于所能收集到的项目信息,并且评价与设计依然处于分离状态,无法改善以往碎片化的评价体系;方法2,通过利用Dynamo或其他编程软件,将评价所使用数据库与参数化模型相关联,实现了设计与评价的动态联动。此方式能够协助设计人员在更改设计方案时快速更新评价结果^[6, 64-65],解决以往评价结果反馈不及时的问题。但是,需要面临不同软件之间的互操作性和兼容性问题,因此以往研究中采用更多的是第一种集成方式。随着BIM技术的逐渐成熟,关于使用方法2促进BIM-LCCA-LCA高度集成化的研究正在逐年增加,更多的研究开始关注在BIM与评价数据库之间建立动态联系,从而真正实现优化评价分析、减少错误,并改进由于不同工具的使用而造成的互操作性问题^[73]。

3 结论

(1) LCCA与LCA方法已经被广泛应用于路面工程中。然而,LCCA影响因素众多,在研究中尚未全面考虑;中国LCA清单信息依赖于文献数据与部分公开的数据,有待进一步建立统一的数据库与评价标准。此外,利用多目标决策分析方法虽然能将LCCA和LCA方法进行整合,但是时间因素的动态影响、系统边界的划分以及所使用的工具等仍须进一步考虑。

(2) 当前BIM软件以及IFC格式标准主要针对建筑工程而开发,且更多地被应用于建筑工程当中,较少的研究关注BIM在路面LCCA和LCA中的应用。研究表明,运用插件以及BIM中可视化编程的功能,同样能够在路面工程中应用BIM集成LCCA与LCA方法,从而优化分析、评价流程,提升效率与准确性,促进路面LCCA和LCA的实施。

(3) 不同软件之间的数据交互依然是BIM-LCCA-LCA高度集成化面临的挑战。目前更多的研究仅将BIM作为数据存储中心,缺少与BIM相对应

的评价软件和数据格式标准来支持自动化的数据交互。Dynamo的应用能够实现BIM模型与Excel之间的数据交换,但是需要手动进行数据的导出与导入。建立更加高度集成化的平台,在路面设计阶段实现自动化的评价过程是未来需要开展的工作。

参考文献:

References:

- [1] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要[A/OL]. (2021-03-23) [2022-10-08]. https://www.ndrc.gov.cn/fggz/fzzlgh/gjzgh/202103/t20210323_1270102.html.
National Development and Reform Commission. The 14th five-year plan for national economic and social development of the People's Republic of China and the long-range objectives through the year 2035[A/OL]. (2021-03-23) [2022-10-08]. https://www.ndrc.gov.cn/fggz/fzzlgh/gjzgh/202103/t20210323_1270102.html.
- [2] SANTOS J, FERREIRA A, FLINTSCH G. A life cycle assessment model for pavement management: methodology and computational framework[J]. *International Journal of Pavement Engineering*, 2015, 16(3): 268-286.
- [3] ZHENG X Y, EASA S M, YANG Z X, et al. Life-cycle sustainability assessment of pavement maintenance alternatives: methodology and case study[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 213: 659-672.
- [4] ZHU D L, WANG J, GU L X. Environmental benefit analysis of hot central plant recycling asphalt pavement based on LCA[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, 766(1): 012101.
- [5] VAN ELDIK M A, VAHDATIKHAKI F, DOS SANTOS J M O, et al. BIM-based environmental impact assessment for infrastructure design projects[J]. *Automation in Construction*, 2020, 120: 103379.
- [6] BUENO C, FABRICIO M M. Comparative analysis between a complete LCA study and results from a BIM-LCA plug-in[J]. *Automation in Construction*, 2018, 90: 188-200.
- [7] MARZOUK M, AZAB S, METAWIE M. BIM-based approach for optimizing life cycle costs of sustainable buildings[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 188: 217-226.

- [8] BABASHAMSI P, MD YUSOFF N I, CEYLAN H, et al. Evaluation of pavement life cycle cost analysis: Review and analysis[J]. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 2016, 9(4): 241-254.
- [9] 罗启添, 游庆龙, 刘福顺. 道路全寿命周期费用分析概述[J]. *公路交通科技*, 2010, 27(增刊 1): 155-158.
LUO Qitian, YOU Qinglong, LIU Fushun. Overview of road life cycle cost analysis[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2010, 27(sup 1): 155-158.
- [10] 万礼锋, 黄加富, 蒋慧杰, 等. 公路项目中全生命周期成本方法应用研究[J]. *天津理工大学学报*, 2006, 22(5): 63-65.
WAN Lifeng, HUANG Jiafu, JIANG Huijie, et al. Study on the application of LCCA method in pavement project[J]. *Journal of Tianjin University of Technology*, 2006, 22(5): 63-65.
- [11] NICUȚĂ A M, ANDREI R, BUDESCU M. Comparative assessment on the ecologic and economic impact of new road technologies integrating reclaimed asphalt pavement [J]. *Advanced Engineering Forum*, 2013(8/9): 147-156.
- [12] QIAO Y N, DAWSON A R, PARRY T, et al. Evaluating the effects of climate change on road maintenance intervention strategies and life-cycle costs[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2015, 41: 492-503.
- [13] MIRZADEH I, BIRGISSON B. Accommodating energy price volatility in life cycle cost analysis of asphalt pavements[J]. *Journal of Civil Engineering and Management*, 2016, 22(8): 1001-1008.
- [14] MEHANY M S H M, GUGGEMOS A A. Risk-managed lifecycle costing for asphalt road construction and maintenance projects under performance-based contracts [J]. *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering*, 2016, 2(4).
- [15] CHEN J S, YANG C H, LEE C T. Field evaluation of porous asphalt course for life-cycle cost analysis[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 221: 20-26.
- [16] QIAO Y N, DAVE E, PARRY T, et al. Life cycle costs analysis of reclaimed asphalt pavement (RAP) under future climate[J]. *Sustainability*, 2019, 11(19): 5414.
- [17] RIEKSTINS A, HARITONOV V, ABOLINS V, et al. Life cycle cost analysis of BBTM and traditional asphalt concretes in Latvia[C]//*Engineering for Rural Development. Latvia University of Life Sciences and Technologies*, 2019.
- [18] QIAO Y N, SANTOS J, STONER A M K, et al. Climate change impacts on asphalt road pavement construction and maintenance: An economic life cycle assessment of adaptation measures in the State of Virginia, United States [J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2020, 24(2): 342-355.
- [19] PAN Y Y, SHANG Y, LIU G Q, et al. Cost-effectiveness evaluation of pavement maintenance treatments using multiple regression and life-cycle cost analysis[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 292: 123461.
- [20] JUNG H, OLI T, NAM J, et al. Life-cycle cost analysis on application of asphalt and concrete pavement overlay[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(10): 5098.
- [21] QIAO Y N, GUO Y R, STONER A M K, et al. Impacts of future climate change on flexible road pavement economics: A life cycle costs analysis of 24 case studies across the United States[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2022, 80: 103773.
- [22] JIANG R, WU P. Estimation of environmental impacts of roads through life cycle assessment: A critical review and future directions[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2019, 77: 148-163.
- [23] 张倩, 徐剑, 张金喜. 路面工程生命周期评价(LCA)方法应用研究[J]. *中外公路*, 2015, 35(5): 346-350.
ZHANG Qian, XU Jian, ZHANG Jinxi. Study on the application of life cycle assessment (LCA) method in pavement engineering[J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2015, 35(5): 346-350.
- [24] INYIM P, PEREYRA J, BIENVENU M, et al. Environmental assessment of pavement infrastructure: A systematic review[J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, 176: 128-138.
- [25] SUH S. Functions, commodities and environmental impacts in an ecological - economic model[J]. *Ecological Economics*, 2004, 48(4): 451-467.
- [26] CRAWFORD R H, BONTINCK P A, STEPHAN A, et al. Hybrid life cycle inventory methods: A review[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 172: 1273-1288.
- [27] KLÜPPEL H J. The Revision of ISO Standards 14040-3-ISO 14040: Environmental management-Life cycle assessment-Principles and framework-ISO 14044: Environmental management-Life cycle assessment Requirements and guidelines[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2005, 10(3): 165.
- [28] 章毅, 刘伟杰. 路面生命周期生态环境影响评价研究综述[J]. *中外公路*, 2013, 33(3): 348-352.

- ZHANG Yi, LIU Weijie. Summary of research on eco-environmental impact assessment of pavement life cycle [J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2013, 33(3): 348-352.
- [29] 翟一杰,张天祚,申晓旭,等. 生命周期评价方法研究进展 [J]. *资源科学*, 2021, 43(3): 446-455.
- ZHAI Yijie, ZHANG Tianzuo, SHEN Xiaoxu, et al. Development of life cycle assessment method [J]. *Resources Science*, 2021, 43(3): 446-455.
- [30] TOKEDE O O, WHITTAKER A, MANKAA R, et al. Life cycle assessment of asphalt variants in infrastructures: The case of lignin in Australian road pavements [J]. *Structures*, 2020, 25: 190-199.
- [31] LIU Y Y, WANG Y Q, AN D. Life-cycle CO₂ emissions and influential factors for asphalt highway construction and maintenance activities in China [J]. *International Journal of Sustainable Transportation*, 2018, 12(7): 497-509.
- [32] GIANI M I, DOTELLI G, BRANDINI N, et al. Comparative life cycle assessment of asphalt pavements using reclaimed asphalt, warm mix technology and cold in-place recycling [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2015, 104: 224-238.
- [33] GSCHÖSSER F, WALLBAUM H, BOESCH M E. Life-cycle assessment of the production of Swiss road materials [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2012, 24(2): 168-176.
- [34] TRELOAR G J, LOVE P E D, CRAWFORD R H. Hybrid life-cycle inventory for road construction and use [J]. *Journal of Construction Engineering and Management*, 2004, 130(1): 43-49.
- [35] YU B, LU Q. Life cycle assessment of pavement: Methodology and case study [J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2012, 17(5): 380-388.
- [36] VIDAL R, MOLINER E, MARTÍNEZ G, et al. Life cycle assessment of hot mix asphalt and zeolite-based warm mix asphalt with reclaimed asphalt pavement [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2013, 74: 101-114.
- [37] ARAÚJO J P C, OLIVEIRA J R M, SILVA H M R D. The importance of the use phase on the LCA of environmentally friendly solutions for asphalt road pavements [J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2014, 32: 97-110.
- [38] ANASTASIOU E K, LIAPIS A, PAPAYIANNI I. Comparative life cycle assessment of concrete road pavements using industrial by-products as alternative materials [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2015, 101: 1-8.
- [39] SMITH S H, DURHAM S A. A cradle to gate LCA framework for emissions and energy reduction in concrete pavement mixture design [J]. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 2016, 5(1): 23-33.
- [40] FARINA A, ZANETTI M C, SANTAGATA E, et al. Life cycle assessment applied to bituminous mixtures containing recycled materials: Crumb rubber and reclaimed asphalt pavement [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2017, 117: 204-212.
- [41] SANTOS J, FLINTSCH G, FERREIRA A. Environmental and economic assessment of pavement construction and management practices for enhancing pavement sustainability [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2017, 116: 15-31.
- [42] JIANG R, WU C K, SONG Y Z, et al. Estimating carbon emissions from road use, maintenance and rehabilitation through a hybrid life cycle assessment approach: A case study [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 277: 123276.
- [43] JIANG Q, WANG F S, LIU Q T, et al. Energy consumption and environment performance analysis of induction-heated asphalt pavement by life cycle assessment (LCA) [J]. *Materials*, 2021, 14(5): 1244.
- [44] CHEN X D, WANG H, HORTON R, et al. Life-cycle assessment of climate change impact on time-dependent carbon-footprint of asphalt pavement [J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2021, 91: 102697.
- [45] PLEȘCAN C, BARTA M, MAXINEASA S G, et al. Life cycle assessment of concrete pavement rehabilitation: A Romanian case study [J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(4): 1769.
- [46] TANG Y X, XIAO J Z, LIU Q, et al. Natural gravel-recycled aggregate concrete applied in rural highway pavement: Material properties and life cycle assessment [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 334: 130219.
- [47] HOSSAIN M U, WONG J J Y, NG S T, et al. Sustainable design of pavement systems in highly urbanized context: A lifecycle assessment [J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 305: 114410.
- [48] 郑玲,张琪,杨密圆. 生命周期成本与生命周期评价: 集成模型与协同路径 [J]. *会计之友*, 2020(9): 47-50.
- ZHENG Ling, ZHANG Qi, YANG Miyuan. Life cycle cost and life cycle assessment: Integrated model and

- collaborative path[J]. *Friends of Accounting*, 2020(9): 47-50.
- [49] UMER A, HEWAGE K, HAIDER H, et al. Sustainability evaluation framework for pavement technologies: An integrated life cycle economic and environmental trade-off analysis[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2017, 53: 88-101.
- [50] SANTOS J, FERREIRA A, FLINTSCH G. A multi-objective optimization-based pavement management decision-support system for enhancing pavement sustainability[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 164: 1380-1393.
- [51] CARVALHO J P, VILLASCHI F S, BRAGANÇA L. Assessing life cycle environmental and economic impacts of building construction solutions with BIM[J]. *Sustainability*, 2021, 13(16): 8914.
- [52] 孙建诚, 朱双晗, 蒋浩鹏. BIM技术在公路工程中的应用研究[J]. *中外公路*, 2019, 39(4): 294-297.
SUN Jiancheng, ZHU Shuanghan, JIANG Haopeng. Application of BIM technology to highway engineering[J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2019, 39(4): 294-297.
- [53] SHIN Y S, CHO K. BIM application to select appropriate design alternative with consideration of LCA and LCCA [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015, 2015: 281640.
- [54] VITÁSEK S, MATĚJKA P. Utilization of BIM for automation of quantity takeoffs and cost estimation in transport infrastructure construction projects in the Czech Republic[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, 236: 012110.
- [55] 胡迎迎. BIM技术下研究道路桥梁造价全过程控制[J]. *工程建设与设计*, 2017(6): 188-189.
HU Yingying. Research on road and bridge whole process cost control under BIM technology[J]. *Construction & Design for Engineering*, 2017(6): 188-189.
- [56] SANTOS R, COSTA A A, SILVESTRE J D, et al. Integration of LCA and LCC analysis within a BIM-based environment[J]. *Automation in Construction*, 2019, 103: 127-149.
- [57] DÍAZ B, RIVERA M, RODRIGUEZ S, et al. Time and cost optimization for road projects through BIM[C]//2019 Congreso Internacional de Innovación y Tendencias en Ingeniería (CONIITI). Bogota, Colombia. IEEE, 2019.
- [58] ZANNI M, SHARPE T, LAMMERS P, et al. Developing a methodology for integration of whole life costs into BIM processes to assist design decision making[J]. *Buildings*, 2019, 9(5): 114.
- [59] KAEWUNRUEN S, SRESAKOOLCHAI J, ZHOU Z H. Sustainability-based lifecycle management for bridge infrastructure using 6D BIM[J]. *Sustainability*, 2020, 12(6): 2436.
- [60] LEE J, YANG H, LIM J, et al. BIM-based preliminary estimation method considering the life cycle cost for decision-making in the early design phase[J]. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 2020, 19(4): 384-399.
- [61] SLOBODCHIKOV R, LOHNE BAKKE K, RAGNAR SVENNEVIG P, et al. Implementing climate impacts in road infrastructure in the design phase by combining BIM with LCA[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, 323(1): 012089.
- [62] MARZOUK M, EL-ZAYAT M, ABOUSHADY A, et al. Assessing environmental impact indicators in road construction projects in developing countries[J]. *Sustainability*, 2017, 9(5): 843.
- [63] 沈琳, 李希胜, 李明瑞, 等. 基于BIM-LCA的建筑环境影响评价方法[J]. *森林工程*, 2015, 31(1): 149-155.
SHEN Lin, LI Xisheng, LI Mingrui, et al. Building environmental impact assessment method based on BIM-LCA[J]. *Forest Engineering*, 2015, 31(1): 149-155.
- [64] NAJJAR M, FIGUEIREDO K, HAMMAD A W A, et al. Integrated optimization with building information modeling and life cycle assessment for generating energy efficient buildings[J]. *Applied Energy*, 2019, 250: 1366-1382.
- [65] RAPOSO C, RODRIGUES F, RODRIGUES H. BIM-based LCA assessment of seismic strengthening solutions for reinforced concrete precast industrial buildings[J]. *Innovative Infrastructure Solutions*, 2019, 4(1): 51.
- [66] RÖCK M, HOLLBERG A, HABERT G, et al. LCA and BIM: Visualization of environmental potentials in building construction at early design stages[J]. *Building and Environment*, 2018, 140: 153-161.
- [67] 章驰, 李希胜. 基于BIM-LCA的建筑方案设计优选方法[J]. *建筑节能*, 2020, 48(5): 33-39.
ZHANG Chi, LI Xisheng. BIM-LCA-based optimization method of building concept design[J]. *Building Energy Efficiency*, 2020, 48(5): 33-39.

- 则:JTG/TF 20—2015[S].北京:人民交通出版社,2015.
Research Institute of Highway Ministry of Transport. Technical guidelines for construction of highway roadbases: JTG/TF 20—2015[S]. Beijing: China communication press, 2015.
- [25] 中国建筑材料科学研究总院.通用硅酸盐水泥:GB175—2023[S].北京:中国国家标准化管理委员会,2007.
China Building Materials Academy. Common portland cement: GB175—2023[S]. Beijing: Standardization Administration of the People's Republic of China,2023.
- [26] 交通运输部公路科学研究院.公路工程水泥及水泥混凝土试验规程:JTG 3420—2020[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2020.
Research Institute of Highway Ministry of Transport. Testing methods of cement and concrete for highway engineering: JTG 3420—2020[S]. Beijing: China Communication Press Co., Ltd.,2020.
- [27] 交通运输部公路科学研究所.公路工程集料试验规程:JTG E42—2005[S].北京:人民交通出版社,2005.
Research Institute of Highway Ministry of Transport. Test methods of aggregate for highway engineering:JTG E42—2005[S].Beijing:China Communication Press,2005.
- [28] 交通运输部公路科学研究所.公路工程无机结合料稳定材料试验规程:JTG E51—2009[S].北京:人民交通出版社,1994.
Research Institute of Highway Ministry of Transport. Test methods of materials stabilized with inorganic binders for highway engineering: JTG E51—2009[S]. Beijing: China Communication Press,2009.
- [29] 侯月琴,纪小平,刘陵庆.水泥稳定再生集料的力学特性及影响因素研究[J].公路交通科技,2016,33(12):56-61.
HOU Yueqin,JI Xiaoping,LIU Lingqing.Study on mechanical property and influencing factors of cement stabilized recycled aggregate[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development,2016,33(12):56-61.
- [30] 栗威,韦慧,王兆仑,等.城市建筑废弃物再生水泥稳定混合料路用性能[J].长安大学学报(自然科学版),2019,39(4):52-61.
LI Wei, WEI Hui, WANG Zhaolun, et al. Pavement performance of a regenerated cement stabilized mixture on construction waste[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition),2019,39(4):52-61.
-
- (上接第94页)
- [68] SOUST-VERDAGUER B, LLATAS C, GARCÍA-MARTÍNEZ A. Critical review of bim-based LCA method to buildings[J]. Energy and Buildings,2017,136:110-120.
- [69] SANTOS R, AGUIAR COSTA A, SILVESTRE J D, et al. Development of a BIM-based environmental and economic life cycle assessment tool[J]. Journal of Cleaner Production,2020,265:121705.
- [70] JALILZAD E, VADIEE A, JOHANSSON P. Achieving a trade-off construction solution using BIM, an optimization algorithm, and a multi-criteria decision-making method[J]. Buildings,2019,9(4):81.
- [71] LU K, JIANG X Y, YU J Y, et al. Integration of life cycle assessment and life cycle cost using building information modeling: A critical review[J]. Journal of Cleaner Production,2021,285:125438.
- [72] WASTIELS L, DECUYPERE R. Identification and comparison of LCA-BIM integration strategies[J]. IOP Conference Series:Earth and Environmental Science,2019, 323(1):012101.
- [73] SAFARI K, AZARIJAFARI H. Challenges and opportunities for integrating BIM and LCA: Methodological choices and framework development[J]. Sustainable Cities and Society,2021,67:102728.
- [74] SANDBERG M, MUKKAVAARA J, SHADRAM F, et al. Multidisciplinary optimization of life-cycle energy and cost using a BIM-based master model[J]. Sustainability, 2019,11(1):286.
- [75] SANTOS R, COSTA A A, SILVESTRE J D, et al. BIM-based life cycle assessment and life cycle costing of an office building in Western Europe[J]. Building and Environment,2020,169:106568.
- [76] SOBHKHIZ S, TAGHADDOS H, REZVANI M, et al. Utilization of semantic web technologies to improve BIM-LCA applications[J]. Automation in Construction, 2021, 130:103842.
- [77] XU J Y, TENG Y, PAN W, et al. BIM-integrated LCA to automate embodied carbon assessment of prefabricated buildings[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 374: 133894.